

FORMULES D'ÉVAPOTRANSPIRATION

En annexes tables utilisables à Madagascar (10° à 25° de latitude Sud)

J. RIQUIER

I.R.S.M. Tananarive

Etant donné l'importance que prend l'irrigation dans le monde, il est utile de connaître les quantités d'eau à apporter aux cultures. Tout calcul de réseau d'irrigation doit être basé sur une estimation de l'évapotranspiration à l'aide de données climatiques, ne serait-ce que pour connaître, après réalisation, les pertes par infiltration.

Nous avons essayé plusieurs formules climatiques à Madagascar. Il est difficile de trouver des formules satisfaisant à tous les climats présents dans la Grande Ile. Après élimination de certaines (comme la formule de Thornthwaite ⁽¹⁾), nous en avons sélectionné neuf ⁽²⁾.

Suivant les données climatiques dont on dispose, on peut se servir de l'une ou de l'autre. Des tables permettent des calculs faciles. Nous avons donné notre appréciation en quelques mots sur ces formules d'après notre expérience à Madagascar. Certaines ont besoin d'autres vérifications, surtout dans le Sud de l'île où l'effet oasis fausse les résultats et d'où nous n'avons encore que peu de renseignements sur les véritables évaporations.

Des cuves Colorado, des lysimètres, le calcul des déficits des fleuves, des mesures d'humidité dans les sols, la mesure de la quantité d'eau utilisée pour l'irrigation, permettront dans l'avenir de tester les formules proposées d'une manière plus précise. Nous donnons comme exemple Tananarive où nous avons déjà recueilli quelques résultats (voir fig. 1). Les diverses formules sont comparées entre elles et à l'évaporation d'une cuve Colorado et d'un lysimètre de 4 m².

FORMULES D'ÉVAPOTRANSPIRATION

I - CONNAISSANT L'INSOLATION $\frac{n}{N}$

n nombre d'heures d'insolation mesurées au solarigraphe Campbell.

N nombre d'heures théorique suivant la latitude et l'époque de l'année.

(1) Les formules les plus utilisées jusqu'à présent, de Thornthwaite et Blaney-Criddle, basées surtout sur la température de l'air, expriment très mal à Madagascar les variations mensuelles de l'évapotranspiration. La radiation solaire (surtout pour l'évaporation de l'eau libre) ou même le déficit de saturation de l'air (évapotranspiration des plantes) sont les éléments climatiques les plus importants.

Par contre, la formule Thornthwaite est généralement valable en données annuelles et peut très bien servir à l'établissement d'une carte climatique.

(2) Parmi ces neuf formules, nous recommandons particulièrement, lorsque leur calcul est possible, les formules suivantes : Penman, Businger, Walker, Turc et Prescott. Walker et Turc sont les plus faciles à calculer, avec une préférence pour la première qui est moins empirique.

1°) Formule de Turc

A/ Humidité relative $> 50 \%$ (moyenne du mois)

$$E T_p \text{ mm/10 jours} = 0,13 \frac{t}{t+15} (I_g + 50)$$

$$E T_p \text{ mm/mois} = 0,40 \frac{t}{t+15} (I_g + 50)$$

(Pour le mois de février, remplacer 0,40 par 0,37)

$E T_p$ = évapotranspiration potentielle en mm

t = température moyenne du mois en °C

I_g = radiation globale réelle en petites calories par cm^2 de surface horizontale et par jour, pendant la période considérée.

$$= I_g A (0,18 + 0,62 \frac{n}{N})$$

$I_g A$ est donné par les tables: c'est la radiation globale théorique, sans nuage à la latitude considérée (voir table $I_g A$ ou R_A)

B/ Humidité relative $< 50 \%$

$$E T_p / \text{mm/mois} = 0,40 \frac{t}{t+15} (I_g + 50) (1 + \frac{50 - \text{humidité relative}}{70})$$

(Pour le mois de février, remplacer 0,40 par 0,37)

Note : Cette formule est bonne, mais empirique, et ne tient pas assez compte de l'humidité de l'air en région aride..

2°) Formule de Walker

C'est une simplification de la formule de Penman

$$E = [(1 - \rho - r) R_1] (1 + \frac{\gamma}{\Delta})^{-1}$$

Pour cuve d'évaporation, en supposant 7 % de réflexion de la lumière (albedo), on obtient :

$$E_0 = 0,93 R_1 (1 + \frac{\gamma}{\Delta})^{-1}$$

Pour calculer l'évapotranspiration potentielle, en supposant 20 % de réflexion pour la végétation (r) et 1 % pour la photosynthèse (ρ) ; on obtient :

$$E_T = 0,83 E_0$$

$$\text{On adopte } R_1 = R_A (0,20 + 0,48 \frac{n}{N})$$

$$\text{d'où } E_0 = 0,93 R_A (0,20 + 0,48 \frac{n}{N}) (1 + \frac{\gamma}{\Delta})^{-1}$$

R_1 = radiation globale vraie

R_A = radiation globale théorique

E_0 = évaporation en mm d'une cuve d'eau

E_T = évapotranspiration potentielle en mm

0,93 R_A est donné par une table en équivalent de mm d'eau

γ est une constante psychrométrique $\approx 0,49$

Δ est la pente de la courbe de saturation de vapeur en fonction de la température

$(1 + \frac{\gamma}{\Delta})^{-1}$ est donné par une table en fonction de la température moyenne du mois.

Il suffit donc de connaître $\frac{n}{N}$ et T

Note : Bonne formule issue d'une formule théorique après simplification; on peut faire intervenir l'albedo des plantes, pour calculer l'évapotranspiration d'une culture donnée (voir valeur des albedo dans les tables.)

3°) Formule de Businger

$$E_T = \frac{\Delta H_T + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

E_T = évapotranspiration potentielle

H_T = radiation nette reçue à la surface de la culture (voir formule Penman).

γ = constante psychrométrique = 0,49 dans le système métrique

E_a = f(u) ($e_a - e_d$) (voir formule de Penman) = évaporation d'une cuve, fonction de la vitesse du vent (u) et du déficit de saturation ($e_a - e_d$)

$$\gamma = 0,92, \text{facteur empirique} = \frac{1}{SD}$$

(S facteur de stomate < 1

D facteur longueur du jour = 0,8 pour région équatoriale).

(γ intègre α de Penman $E_t = \alpha E_o$) voir plus haut et voir table

Note : Bonne formule, mais aussi longue à calculer que celle de Penman. Avantage : introduit les coefficients de la plante (albedo et facteur de stomate).

II - CONNAISSANT L'HUMIDITE DE L'AIR, SANS L'INSOLATION

1°) Formules de Prescott

A) $E_w = 21 \text{ sd}$ (21,9 pour mois de 31 jours; 21,2 pour mois de 30 jours et 19,8 pour mois de 28 jours)

E_w = évaporation mensuelle en mm d'une surface d'eau libre

sd = déficit absolu de saturation en mm Hg = tension de vapeur saturante à la température moyenne du mois (voir table)
x déficit relatif.

déficit relatif = 1 - humidité moyenne mensuelle

B) $E_t = K E_w^{0,75}$ (calculer à l'aide des logarithmes)

E_t = évapotranspiration potentielle en cm par mois

E_w = évaporation d'une nappe d'eau libre en cm par mois

K = coefficient variable suivant la végétation

= 3,1 pour une rizière de très fort rendement

2,4 - - - - de rendement normal

2,0 pour les plantes évaporant énormément (culture de céréales, pâturages intensifs, engrais vert)

1,5 pour les plantes d'évaporation moyenne (prairies naturelles) et les bassins de réception en général

1,0 pour vignoble, culture arbustive ou sol nu

0,5 limite de survie de la plupart des plantes, plantes grasses.

Note : Avantages de cette formule ; elle tient compte à la fois de la température, de l'humidité de l'air et de la culture considérée.

Inconvénient : le facteur 21 varie un peu selon l'aridité du climat : il peut s'abaisser jusqu'à 15 pour les climats désertiques.

2°) Formule de Haude

$$E_w = 11,5 \times (E - e)$$

E_w évaporation en mm par mois d'une nappe d'eau libre

$E - e$ = déficit de saturation en mm Hg, mais pris à 14 h. et à 2 m du sol.

Evaporation par jour = 0,37 ($E - e$)

Note : Avantage : évite de faire des calculs de moyennes d'humidité.

Inconvénients : moins fidèle que Prescott, car peut être perturbée par des conditions locales d'humidité de l'air à 14 h.

Comme pour Prescott, le facteur journalier peut varier de 0,26 à 0,39 (plus faible en climat sec, plus fort en climat humide).

III - CONNAISSANT LA DIFFERENCE ENTRE THERMOMETRES SEC ET MOUILLE

Formules d'Olivier

$$1^{\circ}) \quad M_p = \frac{c}{L\phi S}$$

M_p = évaporation en mm/jour d'une cuve standard à la latitude ϕ Sud
 c = diminution en °C de la température d'un thermomètre humide par rapport à un thermomètre sec (moyenne du mois) obtenue par lecture directe, ou calculée à partir de la température et de l'humidité de la station (différences de température ou d'humidité doivent être prises vers 9 h. du matin).

$L\phi S$ = rapport $\frac{L}{L_0}$ (rapport de radiations) pour la latitude ϕ Sud. $L\phi S$ est donné par les tables

$$2^{\circ}) \quad Cu \phi = c \times \frac{L_0}{L^2} = c (W\phi) = \frac{M_p}{L}$$

$Cu \phi$ = évapotranspiration ou quantité de base à apporter pour une culture en mm/jour à la latitude ϕ

c = moyenne mensuelle de la diminution en °C d'un thermomètre humide par rapport à un thermomètre sec.

$W\phi = \frac{L_0}{L^2}$ facteur cyclique pour un mois particulier (radiation par rapport à la latitude). $W\phi$ est donné par les tables

$\frac{L}{L_0}$ = variation mensuelle du rapport de la radiation totale L à la radiation verticale pour une latitude déterminée.

$$L = \frac{R}{R_v}$$

L valeur annuelle.

L_0 valeur mensuelle moyenne de L .

Note : Avantage : Facile à calculer, à partir des données climatiques courantes.

Inconvénient : formule nouvelle n'ayant pas été testée, exagérant l'évapotranspiration en pays sec.

IV - CONNAISSANT LA RADIATION SOLAIRE VRAIE

1°) Formule de Makkink

$$E_p = 0,61 R_m \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - 0,12$$

E_p = évapotranspiration en mm par jour

R_m = radiation solaire mesurée en mm/jour

Δ = pente de la courbe température/pression de vapeur saturante (voir table)

γ = constante psychrométrique = 0,49 mm Hg/degré centigrade

R_m est exprimé en mm d'eau par jour. On passe facilement des petites calories/cm²/jour aux mm d'eau en divisant par la chaleur de vaporisation de l'eau (voir table ou formule de Regnault) : à 24°C = 589,6 calories sont nécessaires pour vaporiser 1g d'eau. En général, on utilisera la formule :

$$R_m \text{ en mm d'eau/jour} = \frac{R_m \text{ en petites calories/cm}^2}{58,9 \text{ ou } 59}$$

R_m est mesuré directement par un solarimètre Kipp ou un Gunn Bellani étalonné en cal/gr/cm²

Note : Formule simple, mais donnant une évapotranspiration faible (établie pour herbe rase de 2cm de haut). Une herbe haute évapotranspire 10 % de plus qu'une herbe courte d'après Bernard.

2°) Formule de Turc

I_g est mesuré directement par solarimètre ou Gunn Bellani.

3°) Formule de Walker

R_I est mesuré directement par solarimètre ou Gunn Bellani.

V - CONNAISSANT L'EVAPORATION MESUREE PAR UN EVAPOROMETRE PICHE

Formule Bouchet

$$ETP = \alpha E_p \lambda(\theta)$$

ETP = évapotranspiration en mm/jour

E_p = nombre de mm d'eau évaporée dans le Piche en 24 h.

$\alpha = 0,37$ dans le cas où le Piche est placé dans un abri anglais à 2 m au dessus du sol

λ = coefficient fonction de la température θ (voir table)

θ = température moyenne entre la température de l'air et la température du point de rosée θ_r

Ex :

$$\text{Température moyenne de la journée } \frac{\theta(\text{Max.} + \text{Min.})}{2} = 20^\circ$$

$$\text{Température moyenne du point de rosée } \theta_r = 10^\circ$$

$$\theta = 15^\circ \quad \lambda(\theta) = 2,84$$

La température du point de rosée en région humide varie peu à l'échelle de la journée : elle est souvent voisine de la température minimale. On peut en première approximation confondre θ_r et le minimum θ_m ,

$$\text{d'où} \quad \theta \approx \theta_m + \frac{\theta_M - \theta_m}{4}$$

En région sèche, θ_r est généralement inférieur à θ_m , il faut la déterminer grâce à l'humidité relative ou à la différence thermomètre sec - thermomètre mouillé.

Note : Avantage : L'évaporomètre Piche est pratique et robuste.

Inconvénient : Il est très sensible à l'environnement : aération de l'abri, radiation réfléchie par le sol, etc... (deux Piche, l'un à l'observatoire de Tananarive, l'autre au Service météorologique, donnaient des indications variant presque du simple au double). Ne pas employer cette formule en pays sec ou en saison sèche, car elle surestime beaucoup l'évapotranspiration par effet d'oasis. Peut être valable pour une petite surface irriguée, mais non pour un bassin versant.

VI - CONNAISSANT RADIATION SOLAIRE, VITESSE DU VENT, TEMPERATURE, HUMIDITE DE L'AIR

Formule de Penman (1)

$$ET = \frac{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} HT + E_a}{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} + \frac{1}{SD}}$$

$$\text{Pour Businger } \epsilon = \frac{1}{SD} = 0,92 \neq 1 \quad \text{d'où la formule :}$$

$$ET = \frac{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} HT + E_a}{\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} + 1}$$

(1) Rappel de la formule originale de Penman :

$$E_o = \frac{\Delta H_o + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} = \text{évaporation d'une nappe d'eau libre en mm/jour}$$

$$\text{avec } H_o = R_c - R_b$$

$$R_c = R_A (1 - r)(a + b \frac{n}{N})$$

$$r = 0,05$$

ET = évapotranspiration en mm d'eau par jour
 Δ = pente de la courbe de tension de vapeur saturante en mm Hg/°C
 $\Delta = 0,49$ en mm de mercure / °C
 HT = radiation solaire absorbée par la plante et le sol et exprimée en mm d'eau/jour
 $HT = R_C - R_B$ (radiation reçue - radiation diffusée)
 $R_C = R_A (1 - r) (a + b \frac{n}{N})$
 R_A = radiation solaire sans atmosphère
 r = albedo $\begin{cases} 0,05 \text{ pour l'eau} \\ 0,25 \text{ pour herbe, luzerne, blé (0,29 en juillet pour blé)} \\ 0,27 \text{ pour betterave et pour pomme de terre} \end{cases}$
 $a = 0,29 \cos \psi$ (ψ nombre de degrés de latitude du lieu)
 $b = 0,52$
 $\frac{n}{N}$ = insolation relative
 $R_B = \text{chaleur rayonnée par le sol} = \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{ed}) (0,10 + 0,90 \frac{n}{N})$
 $= 2,01 \times 10^{-9}$ mm par jour et par T^4
 T = température absolue
 ea et ed pression de vapeur saturante et pression de vapeur réelle
 $Ea = fu (ea - ed)$ pouvoir asséchant de l'air en mm/jour.
 $fu = 0,27 U_2$
 U_2 vitesse du vent à 2 m de hauteur en m/sec. (peut se déduire de la vitesse à 10 m des stations météo)
 $ea - ed$ déficit de saturation (sd de Prescott) en mm Hg, peut être calculé à partir de la température et de l'humidité relative
Pour $T_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{ed})$ voir table en annexe
 $\Delta = \psi$ voir table en annexe

Note : C'est la meilleure formule mais très longue à calculer et on ne possède pas toujours les éléments nécessaires. Elle peut être appliquée à des périodes aussi courtes que 5 jours.

NOTES COMPLEMENTAIRES

I - D'après beaucoup d'auteurs et notre expérience personnelle, il est faux de prétendre que l'évapotranspiration potentielle est uniquement fonction des données climatiques : elle est aussi fonction de la plante qui couvre le sol. Certains auteurs, Blaney-Criddle ou Prescott, donnent des coefficients de correction à appliquer suivant la plante ou l'état de développement de la plante.

En réalité, l'évapotranspiration potentielle est proportionnelle :

1°) à l'albedo de la surface évaporante, comme l'exprime la formule de Walker. Le coefficient f (valeur 0,75 à 0,80) de Penman, tel que $ET = f E_0$ (ET évapotranspiration, E_0 évaporation d'une nappe d'eau libre) n'exprime en réalité que la différence d'albedo entre l'eau (0,07 environ) et l'herbe (0,25 à 0,30).

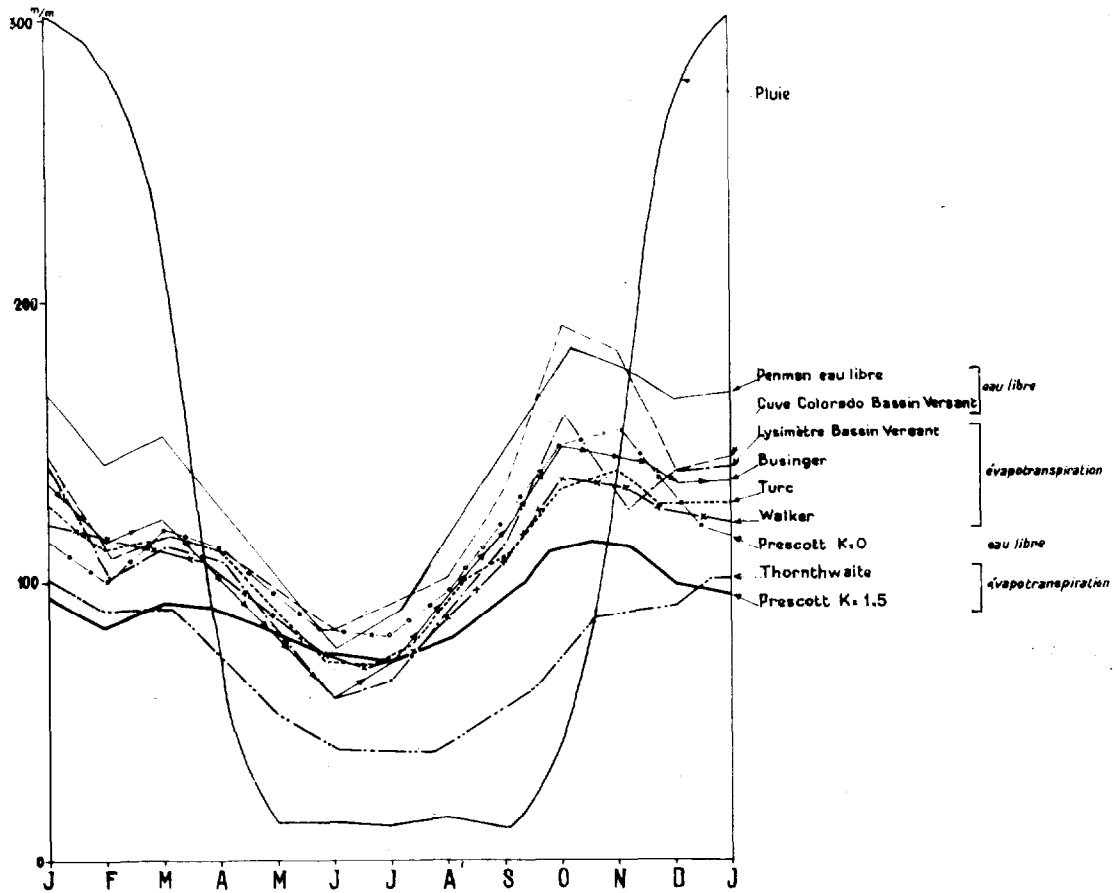
2°) à un coefficient de la rugosité de la culture et à la surface foliaire, qui facilite plus ou moins les échanges de chaleur avec l'atmosphère par convection.

II - Les formules données sont valables pour une surface plane. Il semble que l'énergie globale, donc l'évapotranspiration, pour un versant N ou S est grossièrement proportionnelle au maximum du sinus de l'angle des rayons solaires avec le versant.

III - Il est souvent utile de connaître l'évaporation réelle d'une culture, donc la réserve en eau du sol à une époque déterminée.

Comparaison Formules d'Evapotranspiration

TANANARIVE



ERRATUM : Une erreur s'est glissée dans l'article "Formules d'évapotranspiration", nous vous demandons de remplacer le texte et la figure des pages 40 et 41, par le texte et la figure suivants

Tracé de la courbe évapotranspiration réelle -

Nous traçons les courbes en utilisant un papier millimétré (100 mm = 5 cm - 1 mois = 1 cm)

Soit O le point d'intersection des courbes de pluie et d'évapotranspiration potentielle

1/ - Si le sol a drainé en saison humide donc a constitué sa réserve maxima, on porte 00' = teneur en eau maximum (1) ou le chiffre exact si cette teneur a été déterminée par analyse.

$$\text{teneur en eau maximum} = \frac{\text{HE} \times d \times h}{100}$$

HE humidité équivalente, ou mieux, capacité au champ

d densité apparente

h profondeur utile (= profondeur de pénétration des racines)

2/ - Si le sol n'a pas drainé en saison humide, on porte 00' = teneur en eau réelle à la fin de la saison des pluies et non teneur en eau maximum comme dans le cas précédent.

On mène une parallèle à l'ordonnée passant par le mois qui suit l'intersection des courbes pluie-évapotranspiration potentielle (point R). Dans le cas figuré, la parallèle d'avril coupe les courbes en A et B.

On joint OB et O'R qui se coupent en X.

Soit M le milieu de OA. La droite XM coupe 00' en 0'' et RB en B'.

B' est le point cherché. En effet :

RB = évapotranspiration potentielle

RB' = évapotranspiration réelle

00'' = AB' = perte en eau du sol au mois d'avril

0'0'' = teneur en eau réelle du sol puisque 0'0'' = 00' (teneur en eau maximum) - 00'' (perte en eau)

Dans les triangles semblables X00' XBR et XB'R X0'0'' on trouve bien la relation

$$\frac{\text{RB}'}{\text{RB}} = \frac{0'0''}{00'} \text{ ou } \text{RB}' = \text{RB} \times \frac{0'0''}{00'}$$

$$\text{RB} \quad 00' \quad 00'$$

c'est à dire évapotranspiration réelle = évapotranspiration potentielle x $\frac{\text{teneur en eau réelle du sol}}{\text{teneur en eau maximum}}$

On peut continuer la construction de proche en proche.

Ex. : pour le mois de Mai, on trace la parallèle aux ordonnées passant par R' qui coupe les courbes en C et D.

On joint OD et O'R' qui se coupent en Z.

Soit N le milieu de 0'' C. On joint ZN qui coupe R'D en D'.

D' est le point cherché en effet.

$$\frac{\text{RD}'}{\text{RD}} = \frac{0'0''' }{00'} = \frac{00' - (00'' + 0''0''')}{00'} = \frac{00' - (\text{AB}' + \text{CD}')}{00'}$$

$$\frac{\text{évapotranspiration réelle pour le mois de mai}}{\text{évapotranspiration potentielle}} = \frac{\text{teneur en eau du sol (teneur maximum - perte avril et mai)}}{\text{teneur maximum}}$$

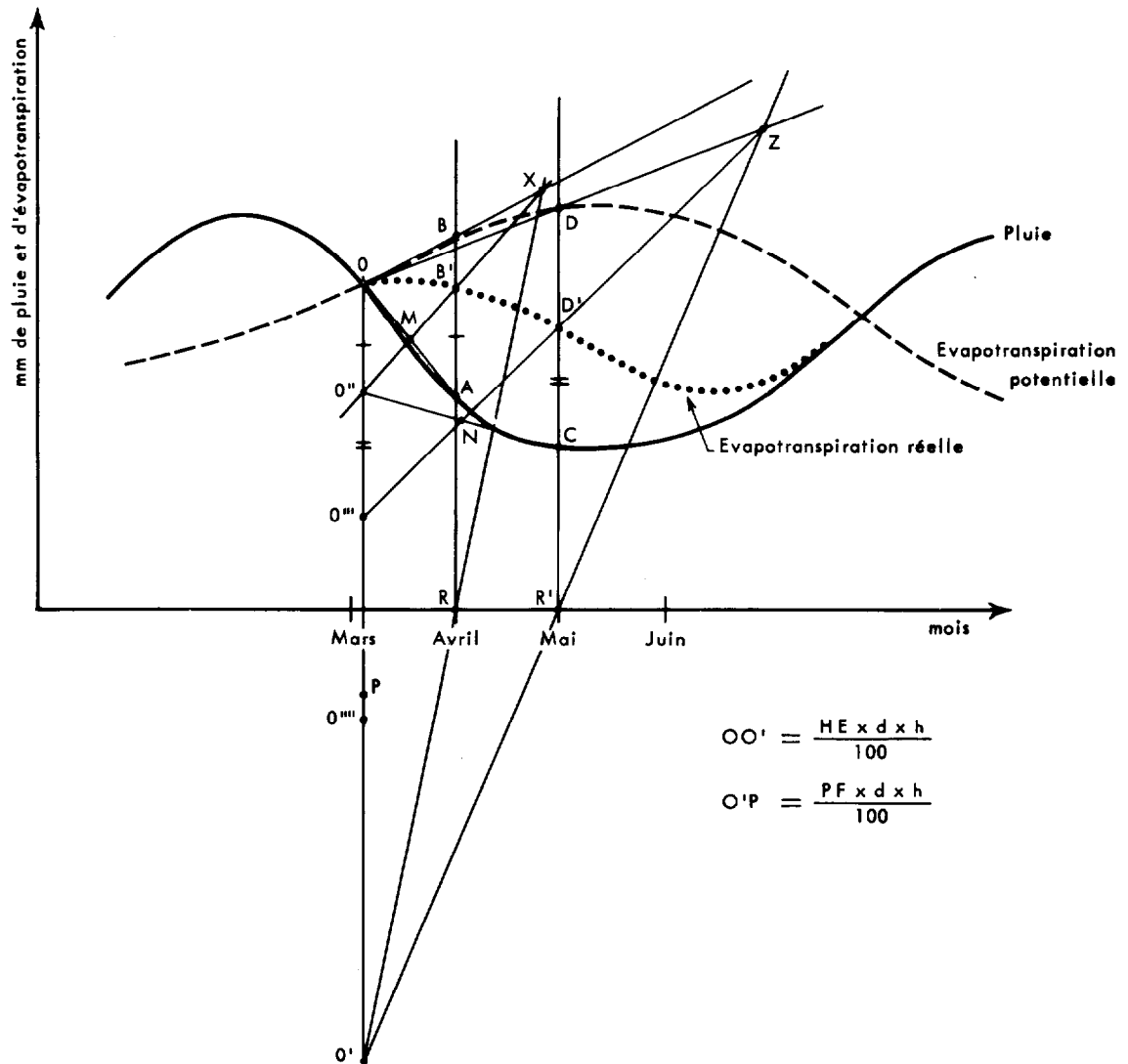
La réserve en eau du sol pour le mois de Mai est alors 0'0''' en mm, et ainsi de suite.

(1) Si le chiffre exact de la teneur en eau maximum d'un sol n'est pas connu, on peut admettre les chiffres suivants :

Semis ou plante à faible enracinement	25 à 50 mm)	pour un sol moyen
Gazon	75 à 125 mm)	
Arbres	200 à 250 mm)	
Sols sableux	50 mm	
Sols argileux	150 mm	

On peut ajouter cependant 50 mm à tous ces chiffres (quantité d'eau qui peut remonter des strates inférieures du sol par diffusion).

Tracé graphique de la courbe de dessèchement des sols



ANNEXES : Valeurs de l'albedo selon divers auteurs

Sol du type Brunizem	0,20
Sol couvert d'herbe	0,35 à 0,40
Sable quartzeux	0,70
Black cotton soil	0,14
Sol alluvionnaire gris	0,60
Sol couvert de poudre de charbon	0,06

Selon ANGSTROM :

Herbe	0,26
Bois de chêne	0,17
Bois de Pin	0,14
Sable humide	0,09
Sable sec	0,18
Epinard	0,26
Herbe sèche	0,30
Canne à sucre jeune sur sol noir	0,06
Canne à sucre en plein développement	0,16
Betterave, blé, pomme de terre	0,26
Blé de printemps couvrant mal le sol	0,21
Blé d'hiver en mai	0,27
Sol nu sec	0,19
Herbe coupée	0,30
Désert	0,24 à 0,28
Culture de types divers	0,03 à 0,25
Forêts vertes	0,03 à 0,10
Pelouses en conditions variées	0,14 à 0,37
Sol nu	0,07 à 0,20
Neige	0,80 à 0,85
Mer	0,08 à 0,10
Terreau noir sec	0,14
- - humide	0,08
Feuilles peu hydratées	0,29
- bien -	0,19
Prairies avant la pluie	0,32
- après - -	0,22

Selon E. A. F. R. O.

Eau libre (cuve peinte en noir)	0,09
Sol nu (sol rouge sec)	0,08
Herbe courte (tondue en saison sèche)	0,21
Forêt de bambou	0,12
Théier	0,16
Arbre bien feuillu	0,18
Herbe sèche	0,06 à 0,10
Moyenne de la terre	0,35 à 0,42
Moyenne de l'océan	0,03

Variations de l'albedo selon l'état de développement de la canne à sucre :

Sol nu (sol noir volcanique)	0,05
Canne jeune	0,06
2e mois	0,09
3e -	0,11
4e -	0,14
5e -	0,16
6e -	-
7e -	-
Repousse 8e mois	0,08
9e -	0,10
10e	0,13
11e	0,16
12e	0,17

Valeur de 0,93 R_A en mm d'eau par mois

Latitude S	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
10°,0	444	495	429	391	350	327	337	370	403	439	447	442
12°,5	450	473	426	380	338	313	322	360	398	439	452	452
15°,0	457	452	424	370	327	299	307	350	393	439	457	462
17°,5	464	452	416	361	313	284	293	341	388	439	462	469
20°,0	472	452	409	353	299	269	279	332	383	439	467	477
22°,5	477	450	402	342	284	255	265	318	376	444	469	482
25°,0	482	449	396	332	269	241	251	304	370	449	472	487

Valeur de $0,20 + 0,48 \frac{n}{N}$

$\frac{n}{N}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,20	0,20	0,21	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,24	0,24
0,1	0,25	0,25	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,29	0,29
0,2	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,33	0,33	0,34
0,3	0,34	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,38	0,39
0,4	0,39	0,40	0,40	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,43
0,5	0,44	0,44	0,45	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,48
0,6	0,49	0,49	0,50	0,50	0,51	0,51	0,52	0,52	0,53	0,53
0,7	0,54	0,54	0,55	0,55	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,58
0,8	0,58	0,59	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,62	0,62	0,63
0,9	0,63	0,64	0,64	0,65	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67

Valeur de $(1 + \frac{\gamma}{\Delta})^{-1} \times 100$ de 0 à 35 °C

Dizaine	0	1	2	3	Unité 4	5	6	7	8	9
30			0°	0,56	1,11	1,67	2,22	2,78	3,33	3,89
40	4,44	5,00	5,56	6,11	6,67	7,22	7,78	8,33	8,89	9,44
50	10,00	10,56	11,11	11,67	12,22	12,78	13,33	13,89	14,44	15,00
60	15,56	16,11	16,67	17,22	17,78	18,33	18,89	19,44	20,00	20,56
70	21,11	21,67	22,22	22,78	23,33	23,89	24,44	25,00	25,56	26,11
80	26,67	27,22	27,78	28,33	28,89	29,44	30,00	30,56	31,11	31,67
90	32,22	32,78	33,33	33,89	34,40	35	-	-	-	-

Ex. : pour une température de 17,78 °C $(1 + \frac{\gamma}{\Delta})^{-1}$ est égal à 0,64

$$L \oslash S = \frac{L}{L_0}$$

Latitude :	10° S	15° S	20° S	25° S
Mois				
Janvier	0,97	0,94	0,91	0,87
Février	0,96	0,95	0,93	0,91
Mars	0,95	0,94	0,93	0,92
Avril	1,00	1,01	1,01	1,00
Mai	1,07	1,10	1,12	1,16
Juin	1,12	1,17	1,21	1,28
Juillet	1,09	1,11	1,15	1,20
Aout	1,02	1,04	1,06	1,09
Septembre	0,97	0,96	0,96	0,96
Octobre	0,95	0,93	0,91	0,89
Novembre	0,95	0,94	0,90	0,87
Décembre	0,97	0,94	0,91	0,87

$$W \oslash S = \frac{L_0}{L_2}$$

Latitude :	10° S	15° S	20° S	25° S
Mois				
Janvier	0,70	0,74	0,76	0,79
Février	0,72	0,72	0,73	0,72
Mars	0,74	0,73	0,72	0,70
Avril	0,66	0,64	0,62	0,60
Mai	0,58	0,54	0,50	0,45
Juin	0,53	0,47	0,43	0,37
Juillet	0,56	0,52	0,47	0,42
Aout	0,64	0,60	0,56	0,50
Septembre	0,71	0,70	0,67	0,64
Octobre	0,74	0,75	0,75	0,75
Novembre	0,73	0,74	0,77	0,79
Décembre	0,70	0,74	0,76	0,79

Valeurs de $I_g A$ ou de R_A en cal/cm²

Latitude	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
10°S	936	930	890	816	746	690	708	773	853	908	928	932
15°S	966	941	878	782	685	634	653	732	830	910	952	968
20°S	989	946	857	739	630	527	595	683	801	905	969	996
25°S	1006	941	831	693	573	510	534	630	766	892	980	1019

Tension maxima de vapeur d'eau en mm/Hg en fonction
de la température

Température en °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10°	9,165	9,227	9,288	9,350	9,412	9,474	9,537	9,601	9,665	9,738
11	9,792	9,857	9,923	9,989	10,054	10,120	10,187	10,255	10,322	10,389
12	10,457	10,526	10,596	10,665	10,734	10,804	10,875	10,947	11,019	11,090
13	11,162	11,235	11,309	11,383	11,456	11,530	11,605	11,681	11,757	11,832
14	11,908	11,986	12,064	12,142	12,220	12,298	12,378	12,458	12,538	12,619
15	12,699	12,781	12,864	12,947	13,029	13,112	13,197	13,281	13,366	13,451
16	13,536	13,623	13,710	13,797	13,885	13,972	14,062	14,151	14,241	14,331
17	14,421	14,513	14,605	14,697	14,790	14,882	14,977	15,072	15,167	15,262
18	15,357	15,454	15,552	15,650	15,747	15,845	15,945	16,045	16,145	16,246
19	16,346	16,449	16,552	16,655	16,758	16,861	16,967	17,073	17,179	17,285
20	17,391	17,500	17,608	17,717	17,826	17,935	18,047	18,159	18,271	18,285
21	18,495	18,610	18,724	18,839	18,954	19,069	19,187	19,305	19,423	19,541
22	19,659	19,780	19,901	20,022	20,143	20,265	20,389	20,514	20,639	20,763
23	20,888	21,016	21,144	21,272	21,400	21,528	21,659	21,790	21,921	22,053
24	22,184	22,319	22,453	22,588	22,723	22,858	22,996	23,135	23,273	23,411
25	23,550	23,692	23,834	23,976	24,119	24,261	24,406	24,552	24,697	24,842
26	24,988	25,138	25,288	25,438	25,588	25,738	25,891	26,045	26,198	26,351
27	26,505	26,663	26,820	26,978	27,136	27,294	27,455	27,617	27,778	27,939
28	28,101	28,267	28,433	28,599	28,765	28,931	29,101	29,271	29,441	29,612
29	29,782	29,956	30,131	30,305	30,479	30,654	30,833	31,011	31,190	31,369
30	31,548	31,729	31,911	32,094	32,278	32,463	32,650	32,837	33,026	33,215
31	33,406	33,596	33,787	33,980	34,174	34,368	34,564	34,761	34,959	35,159
32	35,359	35,559	35,760	35,962	36,165	36,370	36,576	36,783	36,991	37,200
33	37,410	37,621	37,832	38,045	38,258	38,475	38,689	38,906	39,124	39,344
34	39,565	39,786	40,007	40,230	40,455	40,680	40,907	41,135	41,364	41,595
35	41,827	42,059	42,293	42,527	42,763	43,000	43,238	43,477	43,717	43,959
36	44,201	44,445	44,690	44,936	45,183	45,431	45,681	45,932	46,184	46,437
37	46,691	46,947	47,203	47,462	47,721	47,981	48,243	48,506	48,770	49,035
38	49,302	49,570	49,839	50,110	50,382	50,655	50,929	51,205	51,481	51,759
39	52,039	52,320	52,602	52,885	53,170	53,456	53,743	54,032	54,322	54,613
40	54,006	55,200	55,496	55,793	56,091	56,391	56,692	56,994	57,298	57,603

VALEURS DE Δ OU ψ en $\frac{\text{mm Hg}}{^{\circ}\text{C}}$

Température de l'air en $^{\circ}\text{C}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
10	0,62	0,62	0,62	0,63	0,63	0,64	0,64	0,64	0,65	0,65
11	0,65	0,66	0,66	0,67	0,67	0,67	0,68	0,68	0,69	0,69
12	0,69	0,70	0,70	0,70	0,71	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73
13	0,73	0,74	0,74	0,75	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,77
14	0,78	0,78	0,79	0,79	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,82
15	0,82	0,83	0,83	0,84	0,84	0,85	0,85	0,86	0,86	0,87
16	0,87	0,88	0,88	0,89	0,89	0,90	0,90	0,90	0,91	0,92
17	0,92	0,93	0,93	0,94	0,94	0,95	0,95	0,96	0,96	0,97
18	0,97	0,98	0,98	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,02	1,02
19	1,03	1,04	1,04	1,05	1,05	1,06	1,06	1,07	1,08	1,08
20	1,09	1,09	1,10	1,11	1,11	1,12	1,12	1,13	1,14	1,14
21	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,20	1,20
22	1,21	1,22	1,22	1,23	1,23	1,24	1,25	1,26	1,26	1,27
23	1,28	1,28	1,29	1,30	1,30	1,31	1,32	1,33	1,33	1,34
24	1,34	1,35	1,36	1,37	1,37	1,38	1,39	1,40	1,40	1,41
25	1,42	1,42	1,43	1,44	1,45	1,45	1,46	1,47	1,48	1,48
26	1,49	1,50	1,51	1,51	1,52	1,53	1,54	1,55	1,55	1,56
27	1,57	1,58	1,59	1,59	1,60	1,61	1,62	1,63	1,64	1,64
28	1,65	1,66	1,67	1,68	1,69	1,69	1,70	1,71	1,72	1,73
29	1,75	1,75	1,76	1,76	1,77	1,78	1,79	1,80	1,81	1,82
30	1,83	1,84	1,85	1,86	1,86	1,87	1,88	1,89	1,90	1,91
31	1,92	1,93	1,94	1,95	1,96	1,97	1,98	1,99	2,00	2,01
32	2,02	2,03	2,04	2,05	2,06	2,07	2,08	2,09	2,10	2,11
33	2,12	2,13	2,14	2,15	2,16	2,17	2,18	2,19	2,20	2,21
34	2,22	2,23	2,24	2,25	2,27	2,28	2,29	2,30	2,31	2,32
35	2,33	2,35	2,36	2,37	2,38	2,39	2,40	2,41	2,43	2,44

Valeur de λ en fonction de θ (0 à 30°)

θ	λ	θ	λ	θ	λ	θ	λ	θ	λ	θ	λ
0,0 °C	1,82	5,0	2,08	10,0	2,36	15,0	2,84	20,0	3,49	25,0	4,32
0,5	1,85	5,5	2,10	10,5	2,40	15,5	2,90	20,5	3,57	25,5	4,41
1,0	1,87	6,0	2,12	11,0	2,44	16,0	2,96	21,0	3,64	26,0	4,50
1,5	1,89	6,5	2,15	11,5	2,49	16,5	3,02	21,5	3,72	26,5	4,59
2,0	1,91	7,0	2,18	12,0	2,54	17,0	3,08	22,0	3,82	27,0	4,68
2,5	1,93	7,5	2,21	12,5	2,59	17,5	3,14	22,5	3,89	27,5	4,77
3,0	1,96	8,0	2,24	13,0	2,64	18,0	3,20	23,0	3,98	28,0	4,85
3,5	1,99	8,5	2,27	13,5	2,69	18,5	3,27	23,5	4,06	28,5	4,94
4,0	2,02	9,0	2,30	14,0	2,74	19,0	3,34	24,0	4,15	29,0	5,04
4,5	2,04	9,5	2,33	14,5	2,79	19,5	3,42	24,5	4,24	29,5	5,12

Valeur de $0,10 + 0,90 \frac{n}{N}$

$\frac{n}{N}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,15	0,16	0,17	0,18
0,1	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	0,27
0,2	0,28	0,29	0,30	0,31	0,32	0,33	0,33	0,34	0,35	0,36
0,3	0,37	0,38	0,39	0,40	0,41	0,42	0,42	0,43	0,44	0,45
0,4	0,46	0,47	0,48	0,49	0,50	0,51	0,51	0,52	0,53	0,54
0,5	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,60	0,60	0,61	0,62	0,63
0,6	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,70	0,71	0,72
0,7	0,73	0,74	0,75	0,76	0,77	0,78	0,78	0,79	0,80	0,81
0,8	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,87	0,88	0,89	0,90
0,9	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,96	0,97	0,98	0,99

Valeurs de σT^4 mm/jour

Température de l'air en °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
5	11,87	11,89	11,91	11,92	11,94	11,96	11,97	11,99	12,01	12,03
6	12,04	12,06	12,08	12,10	12,11	12,13	12,15	12,16	12,18	12,20
7	12,22	12,23	12,25	12,27	12,29	12,30	12,32	12,34	12,34	12,37
8	12,39	12,41	12,43	12,45	12,46	12,48	12,50	12,52	12,53	12,55
9	12,57	12,59	12,61	12,62	12,64	12,66	12,68	12,69	12,71	12,73
10	12,75	12,77	12,78	12,80	12,82	12,84	12,86	12,88	12,89	12,91
11	12,93	12,95	12,97	12,98	13,00	13,02	13,04	13,06	13,08	13,09
12	13,11	13,13	13,15	13,17	13,19	13,21	13,22	13,24	13,26	13,28
13	13,30	13,32	13,34	13,35	13,37	13,39	13,41	13,43	13,45	13,47
14	13,48	13,50	13,52	13,54	13,56	13,58	13,60	13,62	13,64	13,66
15	13,67	13,69	13,71	13,73	13,75	13,77	13,79	13,81	13,83	13,85
16	13,86	13,88	13,90	13,92	13,94	13,96	13,98	14,00	14,02	14,04
17	14,06	14,08	14,10	14,12	14,13	14,15	14,17	14,19	14,21	14,23
18	14,25	14,27	14,29	14,31	14,33	14,35	14,37	14,39	14,41	14,43
19	14,45	14,47	14,49	14,51	14,53	14,55	14,57	14,59	14,61	14,63
20	14,65	14,67	14,69	14,71	14,73	14,75	14,77	14,79	14,81	14,83
21	14,85	14,87	14,89	14,91	14,93	14,95	14,97	14,99	15,01	15,03
22	15,05	15,07	15,09	15,11	15,13	15,15	15,17	15,20	15,22	15,24
23	15,26	15,28	15,30	15,32	15,34	15,36	15,38	15,40	15,42	15,44
24	15,46	15,48	15,51	15,53	15,55	15,57	15,59	15,61	15,63	15,65
25	15,67	15,69	15,72	15,74	15,76	15,78	15,80	15,82	15,84	15,86
26	15,88	15,91	15,93	15,95	15,97	15,99	16,01	16,03	16,06	16,08
27	16,10	16,12	16,14	16,16	16,18	16,21	16,23	16,25	16,27	16,29
28	16,31	16,34	16,36	16,38	16,40	16,42	16,44	16,47	16,49	16,51
29	16,53	16,55	16,58	16,60	16,62	16,64	16,66	16,69	16,71	16,73
30	16,75	16,77	16,80	16,82	16,84	16,86	16,88	16,91	16,93	16,95
31	16,97	17,00	17,02	17,04	17,06	17,09	17,11	17,13	17,15	17,17
32	17,20	17,22	17,24	17,27	17,29	17,31	17,33	17,36	17,38	17,40
33	17,42	17,45	17,47	17,49	17,52	17,54	17,56	17,58	17,61	17,63
34	17,65	17,68	17,70	17,72	17,75	17,77	17,79	17,81	17,84	17,86
35	17,88	17,91	17,93	17,95	17,98	18,00	18,02	18,05	18,07	18,10

Valeur de $0,56 - 0,092\sqrt{e_d}$ suivant la température
du point de rosée

Température du point de rosée en °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,363	0,362	0,361	0,360	0,360	0,359	0,359	0,358	0,357	0,356
1	0,355	0,355	0,354	0,353	0,353	0,352	0,351	0,350	0,350	0,349
2	0,348	0,347	0,347	0,346	0,345	0,344	0,344	0,343	0,342	0,341
3	0,341	0,340	0,339	0,338	0,338	0,337	0,336	0,335	0,334	0,333
4	0,333	0,332	0,331	0,330	0,330	0,329	0,328	0,327	0,327	0,326
5	0,325	0,324	0,323	0,322	0,322	0,321	0,320	0,319	0,318	0,317
6	0,317	0,316	0,315	0,314	0,313	0,312	0,312	0,311	0,310	0,309
7	0,308	0,307	0,307	0,306	0,305	0,304	0,303	0,302	0,301	0,300
8	0,300	0,299	0,298	0,297	0,296	0,295	0,294	0,293	0,292	0,292
9	0,291	0,290	0,289	0,288	0,287	0,286	0,285	0,284	0,283	0,282
10	0,282	0,281	0,280	0,279	0,278	0,277	0,276	0,275	0,274	0,273
11	0,272	0,271	0,270	0,269	0,268	0,267	0,266	0,265	0,265	0,263
12	0,263	0,262	0,261	0,260	0,259	0,258	0,257	0,255	0,255	0,254
13	0,253	0,252	0,251	0,250	0,249	0,248	0,247	0,246	0,245	0,244
14	0,243	0,242	0,240	0,239	0,238	0,237	0,236	0,235	0,234	0,233
15	0,232	0,231	0,230	0,229	0,228	0,227	0,226	0,225	0,224	0,223
16	0,222	0,221	0,220	0,219	0,217	0,216	0,215	0,214	0,213	0,212
17	0,211	0,210	0,208	0,207	0,206	0,205	0,204	0,203	0,202	0,201
18	0,200	0,198	0,197	0,196	0,195	0,194	0,193	0,192	0,190	0,189
19	0,188	0,187	0,186	0,185	0,183	0,182	0,181	0,180	0,179	0,178
20	0,176	0,175	0,174	0,173	0,172	0,170	0,169	0,168	0,167	0,166
21	0,164	0,163	0,162	0,161	0,160	0,158	0,157	0,156	0,155	0,153
22	0,152	0,151	0,150	0,148	0,147	0,146	0,145	0,143	0,142	0,141
23	0,140	0,138	0,137	0,136	0,134	0,133	0,132	0,131	0,129	0,128
24	0,127	0,126	0,124	0,123	0,122	0,120	0,119	0,118	0,116	0,115
25	0,114	0,112	0,111	0,110	0,108	0,107	0,106	0,104	0,103	0,101

Calcul de la température du point de rosée connaissant la température et l'humidité relative.

$$e_d = \text{humidité de l'air en \%} \times e_a$$

e_a est donné par la table : c'est la tension maxima de vapeur d'eau en fonction de la température. On peut donc calculer e_d .

On utilise la même table en sens inverse : connaissant e_d , on détermine la température correspondante qui est la température du point de rosée.

BIBLIOGRAPHIE

BOUCHET (R. J.) - Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole. Ann. Agro., 1963, 5, p. 743-824.

BUSINGER (J. A.) - Some remarks on Penman's equations for the evapotranspiration. Neth. J. Agr. Sc., 1956, 4, 1, p. 77-80.

HAUDE - Erdkunde, 1959, Bd XIII, heft 3, p. 214.

MAKKINK (G. F.) - Ekzamenen de la formulo de Penman, Neth. J. Agr. Sc., 1957, 5, 4, p. 290-305.

OLIVIER (H.) - Irrigation and climate. Arnold, London, 1961.

PRESCOTT (J. A.) - COLLINS (J. A.) - SHIRPURKAR (G. R.) - The comparative climatology of Australia and Argentina. Geographical review, 1952, XLII, 1, p. 118-133.

TORSÖZ (S.) - Evapotranspiration in the Seyban plain in southern Turkey. C.R. 7ème Congrès International des sols, Madison, 1960, I, communication I - 17, p. 210-216.

TURC (L.) - Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle. Ann. Agro., 1961, 12, 1, p. 13-50.

WALKER - Ghana meteorological department, note n° 6 Accra 1957.